

An underwater scene with various fish swimming among seaweed. The water is a deep blue, and the lighting creates a serene, slightly dim atmosphere. The fish are in various positions, some swimming towards the viewer, others away. The seaweed has long, thin blades that sway gently.

鮭魚溯溪跳躍有何秘訣？鯉魚究竟如何躍過龍門？

海豚與殺人鯨又如何高速衝出水面？

水中生物的運動到底潛藏著什麼秘密？

陳政宏

鯉魚如何躍龍門

——水中生物的推進法

如何「如魚得水」？

我們經常在電視影片中看到，鮭魚為了產卵溯溪而上的過程中，需要不斷地跳躍過許多小瀑布；在中國黃河也有所謂鯉魚躍龍門的情況；許多遊樂場中也有海豚或殺人鯨高速衝出水面的表演項目；而營養豐富的鮪魚，游泳時速可高達80公里！我們人類看到這些水中生物如此高超的游泳性能時，不由得發出讚嘆。

一如人們想學鳥飛一樣，我們也想學學水中生物的游泳方式，看看能否讓自己在水裡的行動也像牠們一般輕鬆敏捷。於是，人類發展出蛙式、蝶式等模仿

水中生物的游泳方式，可是不論那一種，卻始終難以匹敵。反觀水族箱中各種魚類悠閒地游來游去，不由得嘆氣道：比游泳，人就是不如魚。究竟是為什麼呢？人類將來有沒有可能模仿得更好呢？

生物運動的特色

近年來，許多生物力學方面的研究，已漸漸讓我們了解各種生物的不同運動方式。生物力學家們發現，不論是陸上的、空中的還是水裡的動物，在運動方面有幾樣共同的特色。

首先，動物在其運動過程中施於外界的力所產生

的機械能，經常可以循環利用。也就是說，動物釋放出的能量，會先在運動循環過程中的某一階段，以某種方式儲存或保留下來，到下一階段再回收或再利用，因而減少能量的浪費，增加了機械效率。

其次，生物的推進方式常出現不是作用在前進方向的側向力，乍看之下頗沒效率，但對於增加運動的穩定性或操控性卻大有貢獻。

再次，生物控制運動的系統是非常複雜的非線性耦合系統，包含神經與機械的前饋與回饋機制。像肌肉通常不只是做為發動機，還具有煞車、彈簧與支柱的功能，完全視運動狀態而定。

這些特色往往是人造機械所缺乏或少見的，畢竟工程師的設計與改良和天擇演化的機制是不同的，這也導致模仿生物運動方式的困難。

周期性擺動法，是大部分水中生物的游泳方式，一般我們所見的魚類或鯨豚類都是以此為主要推進方式，並輔以其他的鰭作為輔助推力來源及操控方向。不論是鰭或尾，造成力量的方法都是以周期性的擺動，製造出渦流並改變周圍流場的壓力而得。

生物力學家將周期性擺動法依身體擺動範圍分為兩群，首先是以身體及尾鰭的擺動為主的一群，其中還可再依照擺動的範圍大小分為三種。

第一種為鰻游式，如鰻魚、水蛇等，其擺動範圍為全身，特色是每行進單位距離所須推力的成本（消耗能量）最少，迴轉性能極佳。

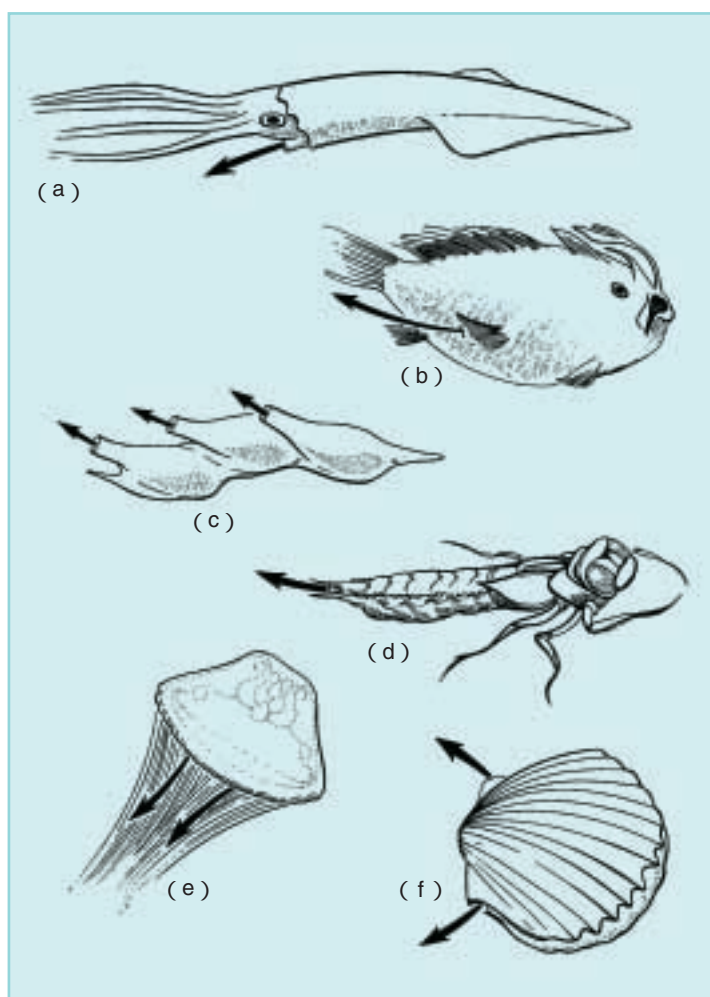
第二種為鱒游式，如鱒魚、鱸魚、鯡魚等，其擺動範圍為體長的後三分之一，推進效率比鰻游式高，速度也較快，但是因為身體較硬，使得迴轉性能稍

水中生物的推進方式

在推進方式方面，水中生物依照生活環境、體型及功能的不同，從形態上來分，常見的運用流體動力特性的推進方式有兩大類 間歇式噴水法及周期性擺動法。

間歇式噴水法，如烏賊、魷魚、水母、扇貝類等，以其身體軀幹的特殊構造，先將一些水含於體內，再以身體的某部分，用力將水向後噴出，利用動量守恆原理向前推進，類似火箭的推進原理。由於牠們噴水的方式是靠身體某部位擠壓水的方式進行，必須等待身體形狀復原後才可再噴一次，因此，噴出的水柱及產生的推力必然是間歇式。牠們通常游得不快，但是，若遇到緊急狀況需要逃命時，牠們可以製造出高速水柱而安然脫身。過去對於這種推進方式的研究並不多，除了看不出明顯的應用外，實驗技術上諸多的困難也是重要原因。

附帶要澄清的是，現代的噴水推進船雖然也是以噴水方式推動，但是卻使用不同的機制，因而能不斷地吸水、噴水，可以持續推進，不是間歇式的。



各種噴水（氣）推進的生物：(a) 烏賊、(b) 蟹魚、(c) 海鞘類動物、(d) 蜻蜓幼蟲、(e) 水母、(f) 蜆。

Stephan Vogel (1994) *Life in Moving Fluids*, 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, New Jersey

差。這是最常見的方式，因為在速度、加速度和操控性三方面上有最好的平衡。

第三種鰭游式，如鮪魚、鯖魚、馬林魚等，其擺動範圍僅有尾鰭部分，較鱒游式更少，而其尾鰭常有較高的展弦比，在快速運動中最有效率，是目前水中環境演化出來最有效率的游泳方式。另外，鯨豚類也應屬於此類，但牠們的尾鰭是水平而非垂直的。由於為求高速運動時的效率，以致其迴轉性能與慢速運動中的效率都不佳，靜止時也無法以較大的加速度起步。

就這三種方式比較，我們可以看出，生物的運動性能在受到物理法則的限制，並沒有十全十美或萬能的方式，但是，不同的生物可以依其生態特性，發展出最適合自身的性能。

周期性擺動法的第二群是以胸鰭或背鰭等身體中段來擺動以製造推力，其中有波動式與振動式兩類。波動式指的是生物胸鰭較大或有較長的背鰭或腹鰭時，將鰭作波浪式運動，常見的有河豚（胸鰭）、淡水電鰻（背鰭）、南美電魚（腹鰭）、飛魚等。而振動式的則見於

有較大或較長的背鰭或腹鰭，例如，翻車魚幾乎沒有尾鰭，而以巨大的腹鰭與背鰭推進。

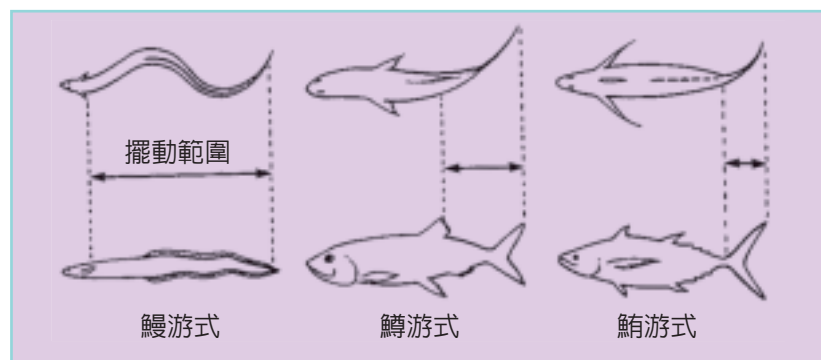
利用周期性擺動法的生物多半速度較慢，因此較少受到工程師的注意。想要模仿生物的工程師較會注意有高效率的水中生物，透過對牠們游泳機制及推進原理的了解，作為模仿的依據。

魚類早就懂得借力使力

經過千百萬年的自然演化，水中生物的游泳技巧與牠們利用流體力學提升運動的本能，著實令學者們讚歎不已。例如，海豚可輕易地以20節的速度跟著船隻游行。魚類的極速雖然未曾有正式紀錄，但一般相信黃鰭鮪魚的速度可達40節，接近每小時80公里以

上；而梭子魚更可以用20G（地球表面的重力加速度）的加速度起步來掠取獵物。另外，魚類可迅速地以只有百分之十到三十身長距離為轉彎半徑，來變換行進方向。

這麼高超又有效率的運動方式，吸引了許多學者投入魚類游泳的研究。其中，一九三六年英國生物學家詹姆士·葛瑞發表了一篇有關海豚的專文，引起廣泛的注意。葛瑞計算一般海豚身形的水中阻力，並以20節的平均速度為基準，將計算的阻力乘以海豚每日平均游行的距離，求取海豚所作的功。另一方面，他記錄海豚每日攝取的食物含量，推算海豚可以運用於游泳的能量。兩相比較之下，他得到了一個令人不可思議的結論，海豚所作的功是其攝取食物熱量的七



周期性擺動法魚類擺尾的方式，依照擺動範圍可分為鰻游式、鱒游式、鮪游式（由左至右）。鰻游式每行進單位距離所需消耗的能量最少，迴轉性能極佳；鱒游式在速度、加速度和操控性三方面上有最好的平衡，最為常見；鮪游式在快速運動中最有效率。

Stephan Vogel (1994) *Life in Moving Fluids*, 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, New Jersey

倍！也就是說，海豚身體的機械效率為700%。這樣的估算容或有誤差，然而其定性的意義——海豚的機械效率超過100%大概錯不了！但是，熱力學定律卻告訴我們，效率是不可能超過100%的。

流體力學家早已知道，任何在流場裡的物體，無論是一根長線，還是一隻游行的旗魚，都會造成一連串尾隨的旋轉渦流，即著名的馮卡門渦旋列，這也是為何溪中的大石後面特別危險的緣故。經過幾十年的研究後，科學家發現，魚可以利用尾鰭的擺動，改變身體附近的流場，造成規則的渦流而形成提供推進力量的噴流——向後高速噴出的水柱，以及直接作用在身體上的高壓區。一般相信，這些噴出的渦流水柱在推進上扮演關鍵的角色，而且適當地運用這些噴流，可

以達到相當可觀的效率。

近年來，較為精密的研究發現，水中生物尾鰭運動的優勢，除了能有更多的操控能力外，還有最具啟發性的一點 能

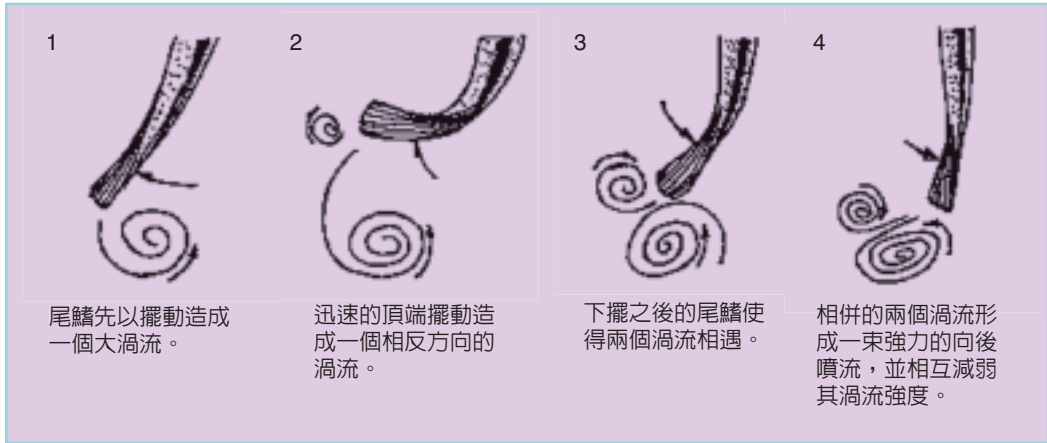
吸收前方物體跡流中所含的水流動能。水中生物的本能，使牠們能精確而又有效地控制尾鰭，來吸取周圍水流的動能，包括一般物體造成的紊性跡流，以及從牠們自己身體前部形成的跡流。這些跡流通常有許多大大小小的漩渦，水中生物巧妙地擺動尾鰭，因此，可以利用已經存在水中的渦流的能量，而不必由自己的擺動來提供所有的能量。也就是說，因為有外來的能量輸入，才使其效率會超過100%。所以，其實並沒有違反熱力學定律。

水中生物高效率推進的原理

鮭魚溯溪而上回產卵地時，利用河流裡石塊後的渦流，來增加牠們向上游的速度，似乎可稍稍解釋牠們何以能一再地跳躍，永不疲憊，原來是牠們用了許多外來的能量，幫助牠們游泳或跳躍。有效運用渦流是一項令人興奮的新方法，其道理是以產生適當的渦流來改變身形周圍的壓力分布，若運用得當，可以大幅降低前進的阻力，進而提高航行的效率。



在河中物體造成的跡流中，魚類利用尾鰭製造旋轉方向與跡流中渦流相反的渦流，以吸收跡流中的動能，減少自身提供用於前進所需的能量，因而提高了推進的效率。



魚類以擺動尾鰭來製造渦流，進而利用此渦流，產生強力的向後噴流以達到快速的起步。

李志揚繪

為了驗證這運用渦流的原理，美國麻省理工學院海洋工程系的研究群，曾將擺動的機器尾鰭放在一圓柱體後，讓一個個由圓柱造成的渦流依序順流而下，與擺動的機器尾鰭交互作用。若加以適當的操作，機器尾鰭可製造出旋轉方向與圓柱跡流中渦流方向相反的對等渦流，當這兩種渦流合併並相互減弱其強度時。尾鰭趁此重新吸收跡流中的動能，可大大增加本身的推進效率。

其實跡流特性的原理，早已經運用在船舶設計上，將船的推進螺槳依照船體本身跡流的特性來設計，稱為「適跡螺槳」。但是，造船工程師至今仍無法十分有效地掌握船尾跡流的特性，特別是無法掌握瞬間的跡流，僅能以平均跡流的特性來設計螺槳，而可變形的複合材料螺槳目前也還在研發當中，當然也就無法像生物般利用各個不同的渦流。

然而，魚和海中哺乳動物顯然深諳這類戲法，知道如何放置牠們的身軀與擺動尾鰭，遠比造船工程師更為熟練這類技巧。我們不是經常看見牠們遊戲、跳

躍，並跟隨著船游行數哩以上嗎？單就這點而言，人類還輸給水中生物一大截呢！不過人類的模仿野心當然不會僅止於如此簡單的原理應用而已。

陳政宏

成功大學造船及船舶機械工程學系